Heatpipes

Heatpipes (warmtepijpen) zijn onderdelen waarmee u heel efficiënt een grote hoeveelheid warmte van punt A naar punt B kunt transporteren. Iedere moderne laptop heeft er minstens één ingebouwd.

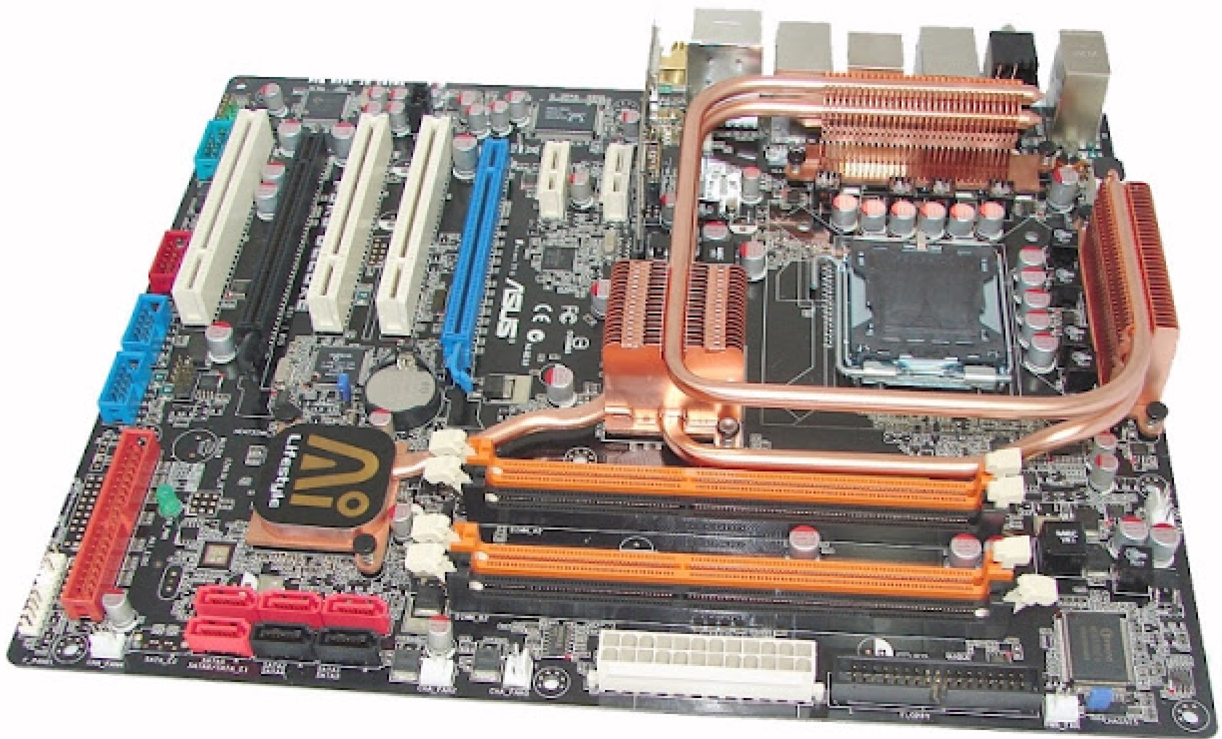
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 04-02-2022

Het probleem van de warmte-afvoer

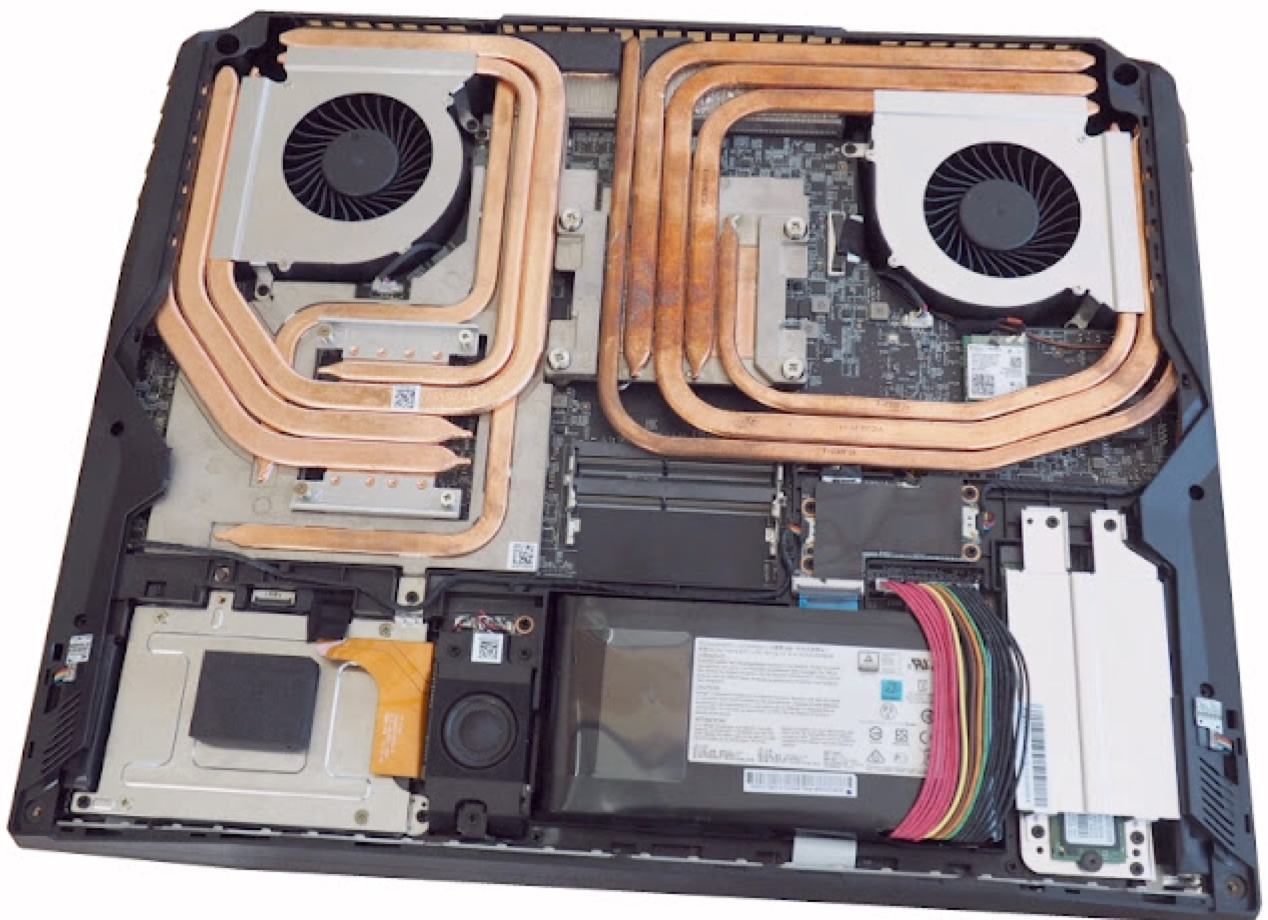
Kleiner, sneller en dus warmer
Door de miniaturisering van de moderne elektronica en de steeds hogere snelheden waarmee digitale schakelingen werken wordt het afvoeren van de opgewekte warmte een steeds groter probleem. Elektronische schakelaars zijn geen ideale schakelaars die traagheidsloos schakelen van een oneindig hoge weerstand naar een weerstand die gelijk is aan nul. Tijdens het omschakelen van '*L*' naar '*H*' en vice versa werkt de elektronische schakelaar heel even in zijn lineaire modus waarbij er een grote spanning over het onderdeel staat en er een grote stroom doorheen vloeit. Er wordt dan flink wat thermisch vermogen in de halfgeleider gegenereerd. Het vermogen is immers gelijk aan het product van de spanning over en de stroom door het onderdeel.
Bij lage kloksnelheden nemen die overgangsverschijnselen maar een heel klein deel van de volledige periode in beslag. Het gegenereerd vermogen kan dan in het overige deel van de periode, waarbij de schakelaar of in sper of in geleiding is, gemakkelijk worden afgevoerd. Naarmate de klokfrequentie stijgt nemen de schakelovergangen een steeds groter deel van de totale periode in beslag en wordt er dus veel meer warmte per seconde in de halfgeleider gegenereerd.

Steeds minder ruimte om te koelen
Dankzij het feit dat de onderdelen steeds kleiner worden en de componentendichtheid op een print steeds groter, wordt elektronische apparatuur steeds compacter. De vrije ruimte in een apparaat die beschikbaar is voor het aanbrengen van verkoelende onderdelen wordt dus ook steeds kleiner.

Van koelplaat over geforceerde koeling naar warmtepijpen
Statische koelprofielen (*heatsinks*) op chip's of transistoren voldoen al lang niet meer en geforceerde koeling door middel van ventilatoren op koelprofielen lopen ook tegen de grenzen van het mogelijke aan. Weliswaar heeft men de mogelijkheid om waterkoeling in een apparaat in te bouwen. Met zo'n systeem is het mogelijk de warmte van componenten via rond stromend water af te voeren naar een warmtewisselaar die buiten de behuizing van het apparaat is aangebracht. Zo'n systeem is echter vrij complex en storingsgevoelig.
Een systeem met heatpipes is gemakkelijker in een apparaat te integreren en omdat zo'n heatpipe geen enkel bewegend onderdeel bevat is de koeling veel storingsongevoeliger dan bij een watergekoeld systeem.
Het gevolg van deze evolutie is echter dat het koelen van elektronica inmiddels een eigen specialisme is geworden. In de onderstaande foto zie u bijvoorbeeld hoe heatpipes op een modern zeer snel moederbord (Asus P5K3 Deluxe) zijn geïntegreerd om de warmte naar buiten af te voeren.


Het gebruik van heatpipes op een modern moederbord. (© Asus)

Geen moderne laptop zonder heatpipes
Ook moderne snelle laptop's kunnen niet zonder het gebruik van deze warmte transporterende onderdelen. Een extreem voorbeeld is de Raider GE76 12UH-014NL Gaming laptop van MSI, die op 5 GHz werkt en meer door een loodgieter dan door een elektronicus in elkaar gemonteerd lijkt te zijn, zie de onderstaande foto. Deze laptop kost wél meer dan € 3.000,00!

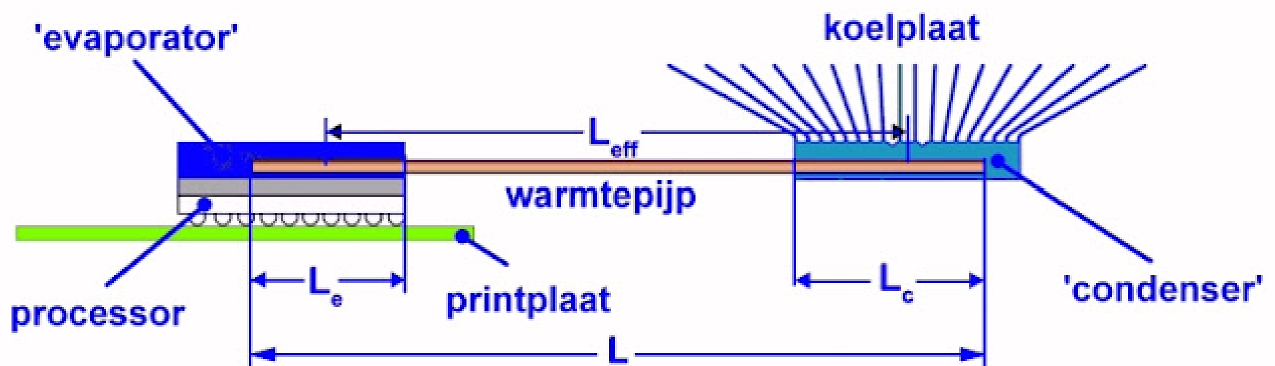

Heatpipes in een moderne laptop. (© MSI)

Het grote voordeel van heatpipes
Misschien denkt u dat u op de bovenstaande foto's een paar massieve koperen pijpen ziet die de warmte van de processor afvoeren naar de koelelementen en ventilatoren. Koper is immers een goede warmtegeleider.
Zo simpel is het niet, een heatpipe is alles behalve dat! Het is een holle pijp van koper, waarin zich fundamentele fysische processen afspelen. Die hebben tot gevolg dat de warmtecapaciteit veel en veel groter is dan die van een massieve koperen pijp. Voor sommige modellen ligt de warmtegeleidbaarheid een factor tien hoger dan die voor massief koper. Dat zegt u waarschijnlijk nog niet erg veel. Volgens een verhaal op Wikipedia kan een heatpipe met een diameter van één inch (2,54 cm) en een lengte van twee feet (60,96 cm) een vermogen van 3,7 kW afvoeren.

De lambda-waarde λ
De lambda-waarde λ geeft de warmtegeleidbaarheid van een materiaal aan. Deze grootheid wordt uitgedrukt in W/m·K. Hoe hoger de waarde is, hoe beter de warmte wordt geleid en hoe minder goed het materiaal isoleert. Zuiver koper heeft een λ van 401 W/m·K, zuiver aluminium 237 W/m·K. Ter vergelijking: een heatpipe heeft een lambda-waarde van meer dan 4.000 W/m·K.

De werking van een warmtepijp

Het principe
In een holle heatpipe zit een vloeibaar transportmedium dat aan de warme kant (links op de onderstaande tekening) verdampt. Omdat het fysische proces '*verdampen*' energie vraagt zal bij dit proces warmte uit de omgeving worden opgenomen. Door die verdamping zet het medium uit en verplaatst zich door de heatpipe naar de koude kant. Hier condenseert het en geeft zijn warmte af, waarna het vervolgens weer als vloeistof terug stroomt naar de warmte kant van de pijp.



Het principe van een warmtepijp. (© Advanced Thermal Solutions, geëdit door Jos Verstraten)

In deze figuur wordt een aantal begrippen geïntroduceerd die u tegen kunt komen in de technische specificaties van leverbare warmtepijpen:

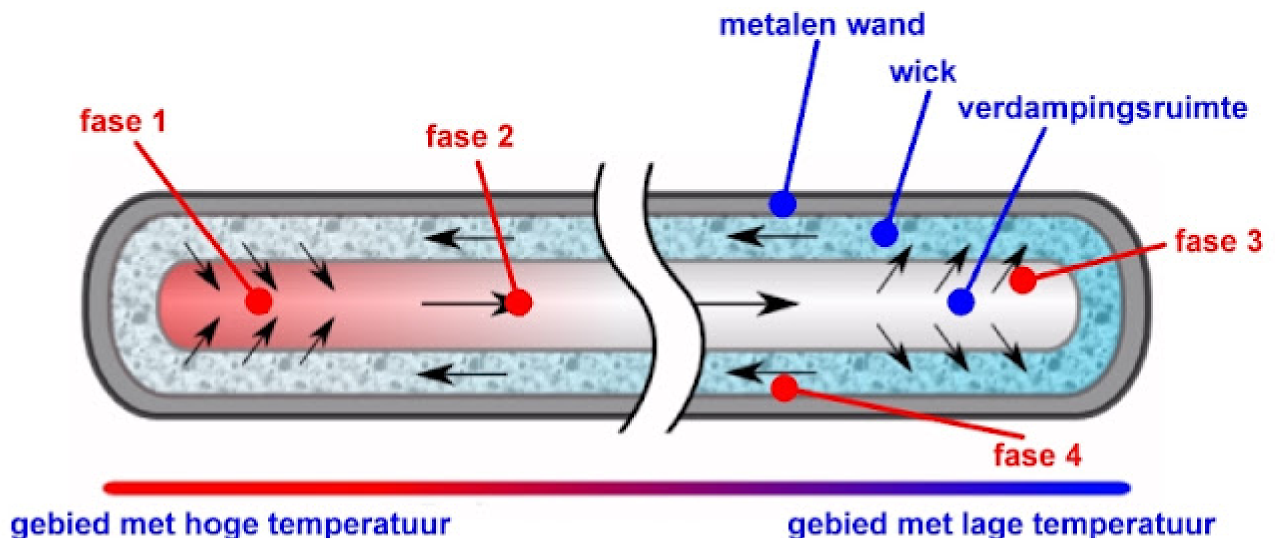
- **Evaporator**
  Het onderdeel dat op de te koelen halfgeleider is aangebracht er zorgt voor de warmte-overdracht naar de heatpipe.
- **Condenser**
  Het onderdeel dat de warmte van het condenserend medium overdraagt op de externe koelplaat.
- **L**
  De meetkundige lengte van de heatpipe.
- **L_{eff}**
  De effectieve lengte van een heatpipe met lengte L.

- **L_e**
  De 'evaporisator insertion lenght'.
- **L_c**
  De 'condenser insertion lenght'.

Niet op maat te zagen!
Uit het feit dat een heatpipe een hol systeem is met daarin een gasvormig medium volgt uiteraard onmiddellijk dat u zo'n onderdeel niet op maat kunt zagen. Heatpipes worden aangeboden met een heleboel lengtes L, van 10 cm tot wel meer dan een halve meter.

Het principe is niet nieuw
Warmtepijpen zijn geen nieuwe technologische ontwikkeling, maar zijn al meer dan een eeuw oud. Zij werden ontwikkeld in de tijd van de stoomlocomotieven en waren bekend onder de verzamelnaam naam '*thermosifons*' of onder de namen van bekende fabrikanten als '*Galloway tubes*' en '*Perkins tubes*'. Tot 1940 werden deze sifons ook vaak toegepast bij de koeling van benzinemotoren.
Het principe werd herontdekt door George Grover in 1963 in het Los Alamos National Laboratory. Het was deze wetenschapper die voor het eerst het woord '*heatpipe*' gebruikte. De NASA nam het idee van Grover over en heeft veel geïnvesteerd in de verdere ontwikkeling van het principe. Het ligt immers voor de hand dat heatpipes, vanwege hun laag gewicht, hun werking zonder externe energietoevoer en constructie zonder bewegende onderdelen, ideaal zijn voor toepassing in satellieten en andere ruimtevoertuigen.
In 1980 begon Sony met het toepassen van heatpipes in haar industriële elektronica producten.

De werking in detail
Heatpipes bestaan dus uit holle metalen pijpen die aan de binnenzijde zijn bekleed met een coating die zorgt voor het terugstromen van het gecondenseerde transportmedium. Die coating wordt in de vakliteratuur de '*wick*' (lont) genoemd. Dat terugstromen gebeurt via capillaire werking in de wick.



De werking van een heatpipe in detail. (© Wikimedia Commons, geëdit door Jos Verstraten)

De werking van een heatpipe berust op het Beginsel van Watt: '*Wanneer twee ruimten, die gedeeltelijk met vloeistof gevuld zijn en met elkaar in gemeenschap staan, in temperatuur verschillen zal stoom in de koudste ruimte stromen en daar condenseren. Reeds gedurende die werking is het verschil in spanning zeer gering; is alle vloeistof in de warmste ruimte verdampt, dan daalt daar de spanning van de damp tot die, welke in de koudste ruimte mogelijk is*'.
De werking kan onderverdeeld worden in vier fasen:

- **Fase 1**
  Het metalen oppervlak van de heatpipe neemt de warmte over van het te koelen onderdeel. Het medium verdampt op het moment dat het in contact komt met dit warme oppervlak en neemt hierbij de verdampingswarmte op.
- **Fase 2**
  Door de volumevergroting van het medium neemt de druk in de linker helft van de heatpipe toe. Door het condenseren enerzijds en het verdampen anderzijds ontstaat er dus een drukverschil dat ervoor zorgt dat het gas gaat stromen en het eigenlijke warmtetransport plaatsvindt.
- **Fase 3**
  Het gasvormige medium stroomt dus naar de rechter kant. Aan deze koudere kant condenseert de damp weer, waarbij de opgenomen warmte vrijkomt.
- **Fase 4**
  Om het gecondenseerde vocht terug te krijgen naar de warme kant van de heatpipe wordt er een beroep gedaan op de capillaire werking van het materiaal van de wick. Het gevolg is dat het condensvocht ook tegen de zwaartekracht in kan stromen. Hierdoor kunnen heatpipes in alle richtingen en met bochten toegepast worden.

De capillaire werking van de wick
Capillaire werking is het verschijnsel in de natuurkunde dat een vloeistof in een zeer fijn buisje, tegen de werking van de zwaartekracht in, kan stijgen of zich horizontaal kan verplaatsen. Zulke fijne buisjes worden haarbuisjes of '*capillairen*' genoemd. Hoe fijner de buisjes, hoe gemakkelijker het water zich in het materiaal zal verplaatsen.
De kracht waardoor het water zich door de capillairen kan verplaatsen wordt de '*capillaire kracht*' genoemd. Die kracht is kleiner naarmate de capillairen fijner zijn. De capillaire kracht is de resulterende kracht van:

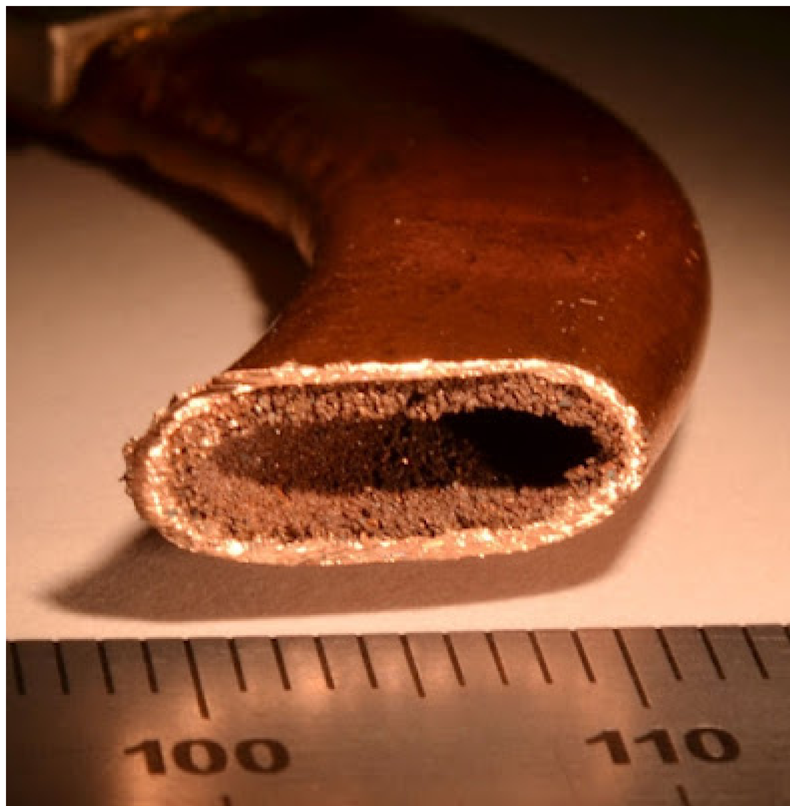
- **De adhesiekrachten**
  De aantrekkingskrachten tussen de moleculen in de wick en de vloeistofmoleculen.
- **De oppervlaktespanning**
  De cohesiekrachten tussen de vloeistofmoleculen aan het contactoppervlak van de wick met de ruimte in de heatpipe.
- **De zwaartekracht**
  Deze werkt tegen de twee vorige krachten in.

Hoewel de capillaire kracht kleiner wordt naarmate het capillair een kleinere diameter heeft, zal de vloeistof toch blijven stromen door de wick omdat de door de verplaatsende vloeistof ondervonden zwaartekracht kwadratisch evenredig afneemt met de afname van de dwarsdoorsnede van het capillair.

De constructie van een heatpipe

Drie onderdelen
Een heatpipe bestaat uit drie onderdelen:
- Het materiaal van de pijp zélf
- Het materiaal van de wick
- Het medium dat de warmte transporteert.

Wil een heatpipe werken, dan moeten die drie onderdelen heel zorgvuldig aan elkaar worden aangepast. In de onderstaande foto wordt een doorsnede door een standaard heatpipe gegeven. Dit is een platte pijp die vaak wordt toegepast in de elektronica.



De samenstelling van een heatpipe in detail.
(© Wikimedia Commons)

Het materiaal van de pijp
Bij de meeste heatpipes is de holle buis gemaakt van koper of aluminium. Deze metalen hebben immers, voor metalen, een uitstekende warmtegeleiding. Deze eigenschap zorgt ervoor dat de op te nemen warmte optimaal in de heatpipe terecht komt. Aan de koele kant geeft het pijpje, door dezelfde eigenschap, de warmte goed af aan het externe koelprofiel. Een extra voordeel van deze materialen is dat zij gemakkelijk te buigen zijn, zodat de warmtepijp zo vervormd kan worden dat zij past in bijvoorbeeld de layout van een laptop. Uiteraard zijn er grenzen aan de buigzaamheid. Bij de meest warmtepijpen wordt aangegeven wat de minimale buigradius is.
Na het aanbrengen van de wick en het vullen van de heatpipe met het koelmedium wordt het buisje vacuüm gezogen en aan weerszijden afgesloten. Door het luchtledig trekken wordt de interne druk verlaagd en zal het koelmedium bij een veel lagere temperatuur verdampen.

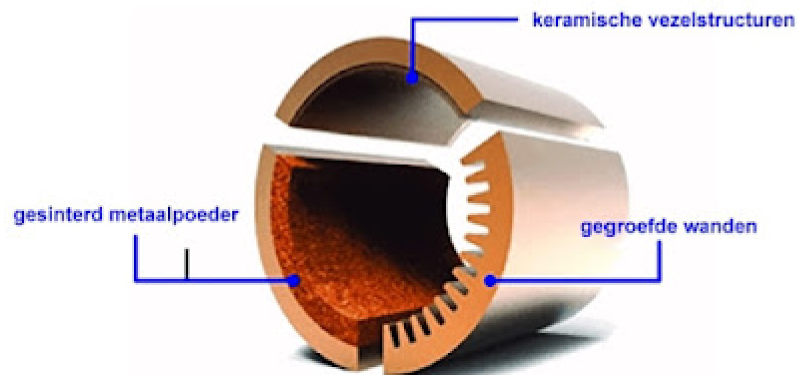
Het koelmedium
Het koelmedium bepaalt volledig het temperatuurbereik waarin u de heatpipe kunt toepassen. Zowel het kookpunt als het condensatiepunt bij de in de heatpipe aanwezige onderdruk moeten immers binnen het temperatuurbereik vallen waarin u de pipe gaat toepassen.
Als u heatpipes toepast voor het koelen van elektronica is er erg weinig keuze. Water is, vanwege zijn kook- en condensatietemperaturen, het voorgeschreven koelmedium voor dit soort toepassingen. Volgens de tabellen kunt u met water gevulde pijpen toepassen in het temperatuurbereik van +5 °C tot +230 °C.
Voor elektronica die ook wel eens kan bevriezen, bijvoorbeeld in zendmasten of in weerballons, is water niet geschikt. Dan kunt u bijvoorbeeld aceton gebruiken (0 °C tot +120 °C) of methanol (-45 °C tot +120 °C). Voor gebruik in schakelingen die extreme koude moeten kunnen verdragen wordt ammonia gebruikt. De temperatuurgrenzen van dit koelmedium liggen bij -70 °C en +60 °C.

Het materiaal van de wick
De belangrijkste taak van de wick is het continu transport van de gecondenseerde koelvloeistof van de koude naar de warme zone van de warmtepijp. Omdat heatpipes in alle standen moeten werken moet dat vloeistof transport ook tegen de werking van de zwaartekracht zonder problemen gebeuren. Vandaar dat een beroep wordt gedaan op

materialen met een grote capillaire werking. Dat is het principe waarmee hoge bomen tóch de sapstroom tot in hun kruin verzorgen of waarmee het kaarsvet in de wiek omhoog kruipt.
Er worden vier wick-structuren in commercieel geproduceerde warmtepijpen toegepast:

- Micro-gegroefde wanden
- Gaasstructuren
- Keramische vezelstructuren
- Gesinterd metaalpoeder

In de onderstaande foto zijn drie van deze wick-structuren samengevat. Natuurlijk zijn hier de afmetingen overdreven voorgesteld. Met zo'n gegroefde wand als op deze afbeelding kunt u geen capillaire werking verkrijgen. In realiteit zijn dat microscopisch kleine groefjes die in de binnenwand van de pipe zijn aangebracht.



De toegepaste wick-structuren. (© ResearchGate)

Soorten van heatpipes

Vlakke heatpipes

Deze worden het meest gebruikt in de elektronica en worden in alle denkbare afmetingen gefabriceerd. Zij zijn steeds van koper gemaakt en gevuld met water. Om u een idee te geven van de prijzen: dergelijke pipes met een oppervlakte van 8 mm bij 3 mm en met lengtes van 8 cm tot 30 cm worden bij AliExpress aangeboden voor prijzen van € 2,76 tot € 4,99 (prijspeil februari 2022).
Het voordeel is dat zij, vanwege hun rechthoekige doorsnede, een goed thermisch contact kunnen maken met koelplaten. Het nadeel is dat zij niet zélf gemakkelijk te buigen zijn.



Goedkope vlakke heatpipes. (© AliExpress)

Ronde heatpipes

Als u een heatpipe op een bepaalde manier moet vormen door deze te buigen kunt u gebruik maken van ronde warmtepijpen. Ook deze zijn in alle mogelijke afmetingen beschikbaar

tegen vergelijkbare prijzen als de vlakke soortgenoten.



Ronde heatpipes zijn gemakkelijk te buigen. (© IndiaMart)

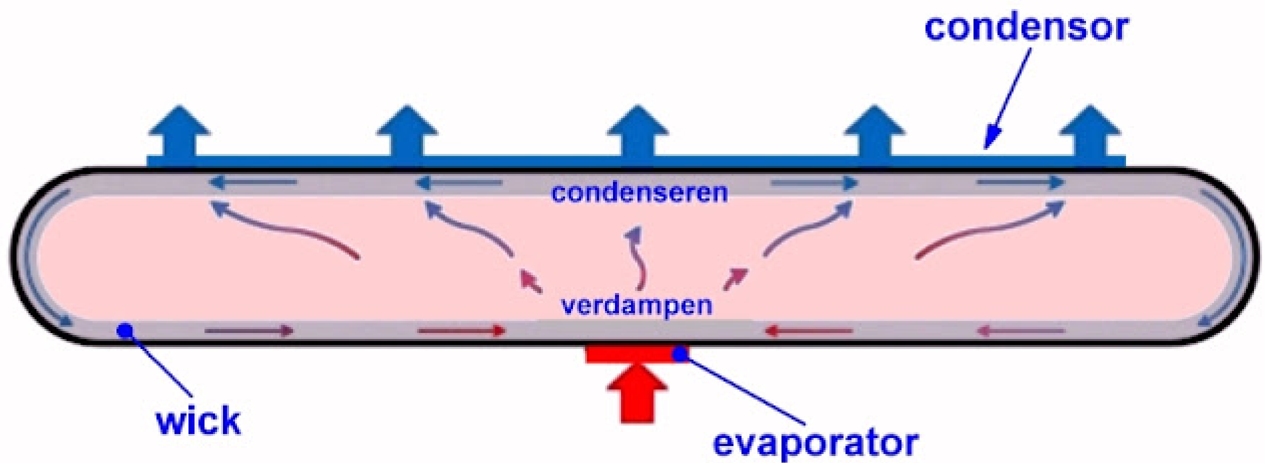
Voor het op een goede manier buigen van ronde warmtepijpen wordt zelfs speciaal gereedschap verkocht. Dat zijn de zogenaamde '*heatpipe benders*'. In de onderstaande foto ziet u zo'n apparaatje dat door alle bekende professionele elektronica leveranciers wordt verkocht. Waarom dit vrij simpel stuk gereedschap, gemaakt door Advanced Thermal Solutions Inc., meer dan tweehonderd euro moet kosten is ons een raadsel...



Een 'heatpipe bender'. (© Advanced Thermal Solutions)

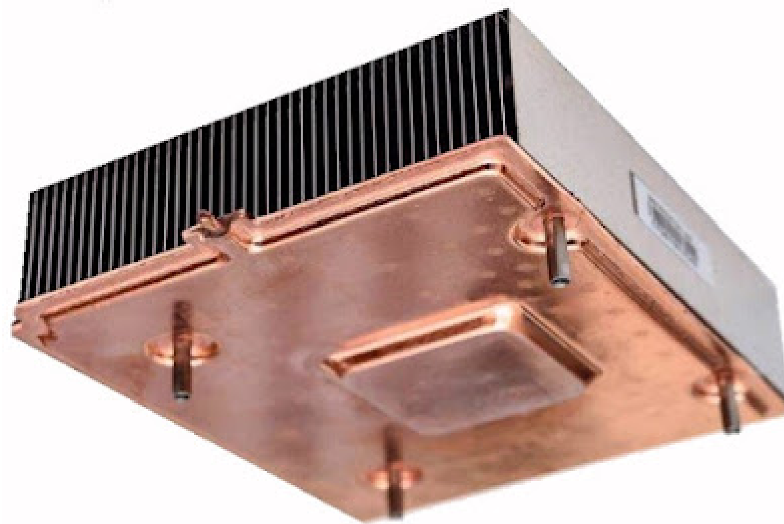
Aanvulling na publicatie van dit artikel
Door een van de lezers wordt er op gewezen dat er een veel goedkopere bender te koop is van het merk Impactics. Deze kost bij diverse Duitse bedrijven slechts € 19,90.

Vapor chambers
Een heel speciale vorm van heatpipe zijn de '*vapor chambers*'. Dat zijn zeer platte uitvoeringen die aan een kant een kleine evaporator hebben en aan de andere kant een hele grote condenser. De bedoeling is dat zo'n chamber met de kleine evaporator kant op bijvoorbeeld een microprocessor wordt bevestigd en met de grote condensor kant op een koelplaat. Vanwege de grote thermische geleidbaarheid van een heatpipe koelt zo'n combinatie beter dan wanneer u de koelplaat rechtstreeks op de processor zou monteren. Alle moderne moederborden en laptops zijn reeds uitgerust met deze technologie.



De werking van een vapor chamber. (© 2022 Jos Verstraten)

In de onderstaande foto ziet u een vapor chamber van Lori Heatsink met aangebouwde koelplaat. Aan de onderzijde bevindt zich het kleine evaporator oppervlak dat u op een chip kunt monteren.



Een vapor chamber met aangebouwde koelplaat. (© Lori Heatsink)

Koelplaten voor heatpipes

Complete systemen
Heatpipes worden op dit moment heel veel toegepast in door de industrie vervaardigde apparaten zoals laptops en moederborden. Het is dan immers geen probleem een fabrikant te vinden die een op maat gemaakte heatpipe plus koelprofiel maakt voor een bepaald type laptop of een bepaald type processor.
In de onderstaande foto ziet u zo´n compleet systeem dat door de Chinese leverancier Sunyon Industry op de markt wordt gebracht. Onder ziet u de adapter die op de te koelen chip wordt gemonteerd en die de warmte overdraagt op een aantal ronde warmtepijpen. Deze pijpen zijn gemonteerd in een door een massief aluminium koelprofiel geboorde gaten.



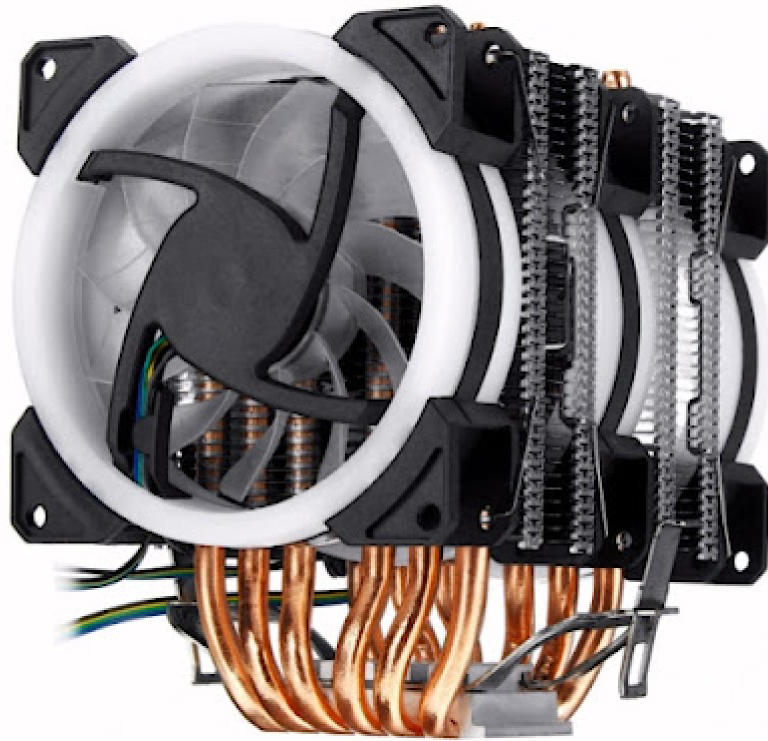
Een compleet systeem voor het afvoeren van de warmte van een chip.
(© Sunyon Industry Co., Ltd.)

Zélf aan de slag met heatpipes?

Anders wordt het als u zélf van de heatpipe technologie gebruikt wilt maken in eigen ontwerpen. Heatpipes zijn te kust en te keur te vinden, dat is niet het probleem. Het probleem is dat u een adapter moet vinden waarmee u de warmtepijp met een zo klein mogelijke thermische weerstand op een chip of transistor kunt bevestigen. Aan de andere kant van de pijp moet u iets verzinnen om, alweer met minimale thermische weerstand, de heatpipe te koppelen aan een koelprofiel.

Het probleem zit hem in de woorden '*zo klein mogelijke thermische weerstand*'. Het is voor een doe-het-zelver praktisch onmogelijk om heatpipes op zo'n manier aan iets te koppelen dat aan die voorwaarde wordt voldaan.

U zult het dus met complete systemen moeten doen, waarvan het aanbod op dit moment overweldigend groot is. Google op '*Heat Pipe Heat Sink*' of '*Cooling CPU*' en u vindt wel voor ieder probleem een kant-en-klare oplossing. Het onderstaand indrukwekkend apparaat is bijvoorbeeld bedoeld voor het koelen van Intel-processoren en wordt door Banggood aangeboden voor € 30,15.



Een 'Heat Pipe Heat Sink'-systeem voor Intel-processoren.
(© Banggood)

De voordelen van heatpipes

Tot slot geven wij nog even een overzicht van de voordelen van het gebruik van heatpipes voor het koelen van elektronische onderdelen. Die komen uit het '*white paper*' dat Telerex over heatpipes heeft samengesteld.

Heatpipes voeren warmte snel af
De circulatie in de heatpipe zorgt voor een snelle en zeer efficiënte verplaatsing van de warmte. Door de hoge thermische geleidbaarheid (meer dan 4.000 W/m·K versus koper 400 W/m·K en aluminium 237 W/m·K) leent het systeem zich dan ook uitstekend voor het snel afvoeren van veel warmte van het ene naar het andere punt. Dit kan grote voordelen hebben in situaties waarin sprake is van hotspots.

Heatpipes zijn ruimtebesparend
Doordat het veel energie kost om een vloeistof te verdampen, is de warmtestroom zelfs in een vrij dunne heatpipe behoorlijk hoog, vele malen hoger dan de stroom die door een even dikke koperen staaf via geleiding kan worden getransporteerd. Zo is de heatpipe een ideale warmte transporteur voor de almaar kleiner wordende elektronica of industriële applicaties waar te weinig ruimte is voor een complete koeler.

Heatpipes kunnen het koeloppervlak vergroten
Surface-mounted device (SMD) zijn zo klein dat ze warmte zeer moeilijk kunnen afstaan aan de omgeving. Dit kan worden opgelost door op het onderdeel een vapor chamber te plaatsen. Met een vapor chamber kan het koelend oppervlak veel groter worden gemaakt. Zo'n vapor chamber is immers niets anders dan een heatpipe, maar dan bestaande uit een platte, doosvormige ruimte gevuld met vloeistof. Die vloeistof transporteert de warmte van het kleine ondervlak naar het veel grotere bovenvlak.

Heatpipes zijn energiezuinig
De energiezuinige werking is een groot voordeel van deze vorm van koeling. Een heatpipe heeft geen extra energie nodig om de warmte af te voeren, zoals dat wel het geval is bij

bijvoorbeeld een ventilator of een Peltier-element.

Lange levensduur en onderhoudsvrij
Heatpipes slijten niet. Ze functioneren onafhankelijk van een externe energiebron, de werking start automatisch bij een temperatuurverschil tussen punt A en punt B. Zij hebben geen bewegende onderdelen of een pomp. Zolang de luchtdichte afdichting in stand wordt gehouden en de capillaire laag intact is, gaan ze levenslang mee.